UNIVERSITÉ DE MONTRÉAL

CENTRE DE RECHERCHE SUR LES TRANSPORTS

CASE POSTALE 6128, SUCCURSALE A, MONTRÉAL, QUÉBEC, H3C 3J7

COMMANDE DÉCENTRALISÉE DES FEUX DE CIRCULATION

par

Marc Kaltenbach*

* Bishop's University, Lennoxville, Québec J1M 1Z7

Université de Montréal
Centre de recherche sur les transports - Publication #295
Mars 1983

Dépôt légal - 2e trimestre 1983

SOMMAIRE

Les paramètres d'espace et de temps associés à une méthode de commande décentralisée des feux de circulation urbaine sont étudiés. Ceci met en évidence la possibilité d'obtenir une amélioration sensible des méthodes actuellement utilisées.

- - - - - - - - - - - - - - -

INTRODUCTION

l'idée d'une commande décentralisée en temps réel des feux de circulation véhiculaire urbaine est fort ancienne. lors de la mise en place des premiers systèmes de régulation automatique il a semblé qu'une commande par rétroaction ("feedback") simple pourrait suffire; une approche consistant à mesurer la vitesse et l'intervale entre véhicules pour déterminer si la phase courante, rouge ou verte, d'un feu de signalisation vers lequel les véhicles se dirigent doit ou ne doit pas être prolongée a donc été proposée. Toutefois en dépit de quelques succés dans le cas d'intersections isolées elle s'est révélée plutôt décevante quand appliquée aux réseaux. Il apparait maintenant que s'il existe une commande décentralisée en temps réel qui soit compétitive avec les méthodes de plans fixes de type TRANSYT (1) ou SIGOP cette commande doit faire appel à des concepts de coordination entre sous-systèmes prenant directement en compte l'espace et le temps. la coordination dans l'espace signifie que l'indice de performance associé à un sous-système doit tenir compte de l'effect de la régulation de ce sous-système sur les autres sous-systèmes et, par leur intermédiaire, sur la performance du système global. La coordination dans le temps signifie qu'il faut prévoir les effets de la régulation présente sur les états futurs du système. C'est précisément ce dernier point que négligaient les méthodes "vitesse-intervales" mentionnées plus haut. Le passage des véhicules d'une intersection à la suivante peut bien effectuer une sorte de coordination dans l'espace mais la commande effective n'existe que seulement en réponse à une congestion observée et donc trop tard.

Si les commandes aux divers noeuds (intersections) d'un réseau ne peuvent être indépendantes les unes des autres il semble toutefois raisonable de penser que les effets de la régulation locale sur la régulation à l'échelle de l'ensemble du réseau s'estompent lorsque l'on considère des noeuds éloignés les uns des autres dans l'espace et des temps éloignées dans le futur. Cette idée fut à la base de l'algorithme de Miller (2) au début des années soixantes

mais n'a été suivie d'aucun dévelopement sérieux jusqu'à la parution récente du système SCOOT (3) qui s'en inspire très largement. Les auteurs de SCOOT rapportent (4) des tests sur le terrain (ville de Glasgow) indiquant une diminution significative (11%) du délai subi par les véhicules par rapport au délai obtenu avec TRANSYT.

Dans cet article nous présentons une approche qui généralise l'algorithme de Miller et certains dévelopements de SCOOT. Nous nous limitons à un modèle simplifié, mais suffisant pour permettre d'apprécier les résultats et exigences de la commande décentralisée en temps réel.

L'article débute par une description sommaire du modèle utilisé pour la simulation des flots de véhicules dans les réseaux. Ceci sert alors de base pour la description du mode de régulation décentralisée que nous avons étudié. En fin d'article nous exposons des résultats numériques qui renseignent sur la sensibilité du modèle par rapport aux paramètres d'espace et de temps associés à la méthode.

I LE MODELE DE SIMULATION

1 - Modèle déterministe discrétisé :

La représentation des véhicules sur un arc (lien orienté entre deux intersections) d'un réseau de voies urbaines est identique à celle retenue par le modèle TRANSYT. On considère les distributions de véhicules sur les arcs du réseau seulement aux instants successifs t = 0,Del,2*Del,...etc. où Del est le pas de discrétisation. Les distributions de véhicules sont approximées par des histogrammes (voir la figure 1) dont les blocs ont pour largeur V * Del mètres où V est la vitesse (m./sec.) des véhicules en mouvement libre; la hauteur d'un bloc donne le taux de passage des véhicules (véhicules/sec.) sur les points du segment de rue correspondant à la base du bloc.

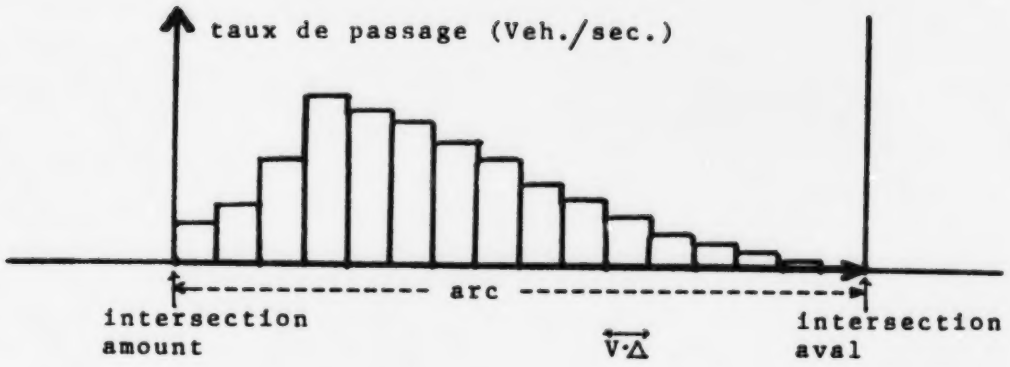

figure 1 : distribution des véhicules en mouvement libre sur un arc.

A chaque arc du réseau on associe des coefficients indiquant les pourcentages de véhicules engagés sur l'arc qui quitteront cet arc par un tournant à droite, à gauche ou sans tourner. On associe aussi des taux de service qui indiquent les taux maxima (veh./sec.) de sortie des véhicles de l'arc selon les directions admissibles dans le cas où il y a suffisament de véhicules pour saturer ces taux de passage et assez d'espace sur les arcs avals pour recevoir les véhicules.

Les accumulations de véhicules aux noeuds sont obtenues en laissant les véhicules sur un arc parcourir l'arc en mouvement libre (vitesse V) sur toute sa longueur et alors seulement, si nécessaire, joindre une file d'attente à l'extrémité de l'arc. Cette représentation est correcte si l'objectif du modèle est de calculer la somme des délais encourus par les véhicules emprumptant le réseau au cours d'une période donnée (délai total). Si l'objectif est de calculer les pertes d'énergie cinétique dues aux arrêts ou ralentissements de véhicules il devient nécessaire de prendre en compte la dynamique interne des files d'attente. Les bases d'une telle représentation de la dynamique interne des queues ainsi que d'autes aspects du modèle ont été élaborées en (5); un rapport plus détaillé est en préparation. Pour résumer, il est maintenant possible de simuler les flots de véhicules sur de grands réseaux sans avoir à introduire d'arcs fictifs (dummy links) et sans craindre d'excéder le taux maximum de passage V/Del et la capacité de stockage de véhicules sur un arc. La simulation s'effectue par calculs simultanés pour chaque arc du réseau avec la seule contrainte d'un échange d'information entre arcs voisins après chaque pas de simulation (de durée Del secondes); l'avantage de cette représentation est qu'elle peut être réalisée par un réseau de micro-processeurs.

2 - Commande avec cycles variables :

On considère le cas d'intersections simples (en croix). Le droit de passage à l'extrémité d'un arc est représenté par une sequence $u_0, u_1, u_2, \ldots$etc de valeurs 0 ou 1

correspondant aux intervales de temps successifs (0,Del),(Del,2*Del),...etc. Dans un modèle simple une valeur 0 indique une durée de rouge de Del secondes et une valeur 1 une durée de vert de Del Secondes pour une approche particulière d'un noeud . Dans un modèle plus élaboré les états d'un feu de signalisation pour une approche donnée du noeud sont déterminés par l'intermédiaire d'une fonction de la séquence de commande; par ce moyen on peut tenir compte des périodes oranges et vertes avancées; on peut aussi introduire des délais dûs à la période d'accélération des véhicules en début de vert. Une seule séquence suffit pour déterminer les phases successives (rouges ou vertes) d'un feu de signalisation à une intersection donnée si les phases oranges et vertes avancées ont des durées fixes et l'ordre d'apparition des phases ne varie pas. Le mode de commande traditionnel à "temps fixes" au noeud générique d'indice N peut être obtenu par la formule :

$$u_t = 1 \quad \text{si } (t + \text{OFFSET(N)}) \text{ MOD CYCLE} < \text{SPLIT(N)}$$
$$= 0 \quad \text{autrement}$$

où CYCLE,OFFSET et SPLIT sont des entiers représentant des unités de Del secondes et MOD est l'opération arithmétique "modulo". CYCLE donne la durée du cycle commun à tous les noeuds du réseau, OFFSET(N) indique le déphasage du temps de départ du cycle au noeud N par rapport à un temps témoin. SPLIT(N) donne le découpage du temps de cycle disponible en une durée verte et une durée rouge.

Nous avons étudié un mode de régulation plus général dans lequel sont spécifiées seulement une borne inférieure et une borne supérieure pour la durée des phases rouges ou vertes. Ainsi une phase verte de "courte" durée n'est plus contrainte à être suivie par une "longue" phase rouge.

En résumé le modèle prend la form d'un système dynamique discrétisé :

$$X_{t+1} = F(X_t , U_t , Q_t) \qquad t = 0,1,2,...\text{etc,}$$

où X_t est un vecteur d'état représentant la distribution

des flots et queues de véhicules sur les arcs internes du réseau au temps t * Del; U_t représente l'action de commande aux noeuds du réseau pour la durée

$$(t * Del, (t + 1) * Del);$$

Q_t donne les arrivées de véhicules aux entrées du réseau; les arrivées Q_t, t = 0,1,...etc, et l'état initial X_0 du système sont externes au modèle.

II LA COMMANDE DECENTRALISEE

1 - Décomposition dans le temps, horizons fuyants : Au modèle de simulation que nous venons de définir nous associons le problème d'optimisation P(t) :

$$\text{Minimiser} \sum_{k=t+1}^{t+T} \text{Délai}(k)$$

$$\text{par rapport à} \quad U_t, U_{t+1}, \ldots, U_{t+T-1}$$

où Délai(k) est le délai total associé à une simulation des flots de véhicules dans le réseau pour la durée (t * Del, (t+T-1) * Del) pour un état initial du système X_t estimé et des arrivées aux entrées du réseau $Q_t, Q_{t+1}, \ldots, Q_{t+T-1}$ estimées. T est appelé l'horizon d'optimisation.

Le problème d'optimisation est décomposé dans le temps quand on se borne à résoudre successivement les problèmes P(0),P(1),P(2),...etc, pour une valeur T que nous supposerons commune à tous ces problèmes. Chaque problème constitue une étape d'optimisation. Supposant P(t) le dernier en date de ces problèmes résolu, on applique sur le terrain seulement la partie de la commande optimisée qui correspond au début (premiers pas) du dernier horizon T considéré. Dans nos expériences numériques nous avons utilisé seulement le premier pas U_t de cet horizon de T pas. Pendant ces Del secondes d'application de la commande, il faut déterminer une estimée de l'état du système au temps (t+1) * Del et résoudre le problème

P(t+1). Cette procédure en se répètant indéfiniment approxime le concept de commande optimale par rétroaction selon le schéma appelé "Open-Loop-Feedback" (6) .

2 - Décomposition dans l'espace : Pour des valeurs de T suffisament grandes (par exemple > 10) il semble illusoire que l'on puisse résoude le problème P(t) dans le temps très bref requis par une application en temps réel sur le terrain. Des approximations supplémentaires sont requises. En accord avec l'idée de commande décentralisée, le réseau de circulation donné,appelé dorénavant réseau global, est décomposé en sous-réseaux se recouvrant par voisinage. Chaque sous-réseau est déterminé par la sélection d'un noeud (du réseau global) choisi pour en optimiser la commande, (nous l'appelons le noeud choisi) et des noeuds et arcs complémentaires dans un voisinage du noeud choisi. Ainsi on parlera du sous-réseau N associé au noeud choisi N. Nous pouvons alors considérer la restriction $P_N(t)$ du Problème P(t) au sous-réseau N. Les arrivées aux entrées du sous-réseau N sont déterminées par simulation préalable des séquences de commande obtenues pour tous les noeuds du réseau global à l'étape d'optimisation précédente. Ces séquences sont également utilisées aux noeuds non-choisis du sous-réseau N dans le calcul du délai total associé à la commande au noeud N.

A l'étape d'optimisation t, les problèmes $P_N(t)$ associés à tous les noeuds choisis du réseau global sont résolus en parallèle. Une difficulté survient alors; il est clair que si un noeud M non-choisi d'un sous-réseau N se trouve être le noeud choisi du sous-réseau M, une erreur pourra être faite dans la détermination de la commande optimale au noeud N; en effet la résolution du problème $P_M(t)$ peut changer considérablement la commande au noeud M et ainsi fausser les conditions dans lesquelles $P_N(t)$ a été résolu. Nous appelons cette erreur l'erreur de coordination. Un moyen d'atténuer l'erreur de coordination est d'accroître la valeur de l'horizon T. Des justifications d'ordre théorique peuvent être apportées à ce rôle coordinateur de T. En particulier, si tous les noeuds du réseau global sont

choisis pour optimisation, on observera qu'une commande proposée u_t est soumise à T révisions avant d'être appliquée sur le terrain . Dans cet article nous nous bornerons à constater ce rôle de T par l'intermédiaire d'un exemple numérique.

III EXPERIENCES NUMERIQUES

La figure 2 présente un réseau de 4 rues "horizontales" et 7 rues "verticales" à sens uniques; les véhicules ne tournent pas aux noeuds où les taux de services sont tous égaux à 2.75 veh./sec.; la vitesse libre des véhicules est de 12 m./sec. et le pas de discrétization de Del = 4 sec. Des arrivées périodiques sont spécifiées aux entrées du réseau. l'objectif est de minimiser le délai total. Nous allons simuler le système de commande pour une durée de 100 étapes. Dans toutes les expériences rapportées ci-dessous les phases rouges ou vertes sont contraintes de durer au minimum 6*Del sec. et au maximum 12*Del Sec.

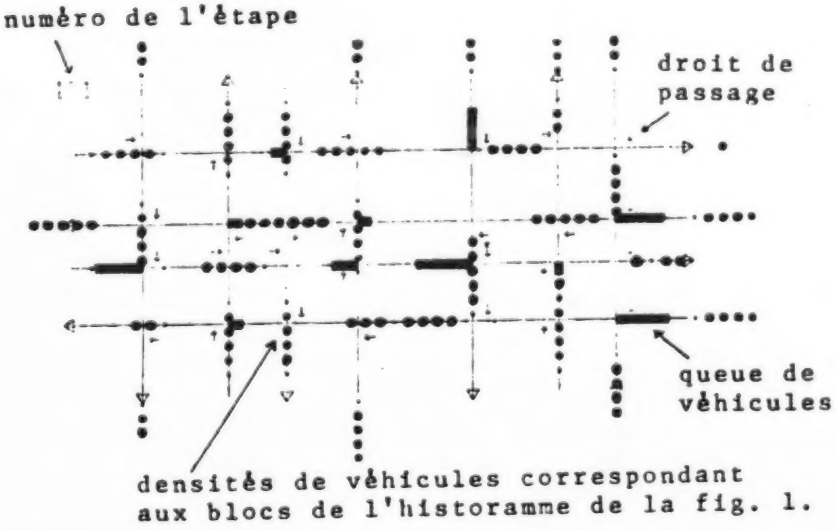

figure 2 : réseau 4*7 et distributions de véhicules.

1 - Résultats avec la commande traditionnelle : Pour motif de comparaison nous avons optimisé la commande sur l'intervale de 100 étapes en utilisant la commande traditionnelle avec cycle constant obtenue par une méthode similaire mais que nous pensons plus exacte que celle utilisée dans TRANSYT. Cette optimisation a donné le coût minimum Délai(100) = 45,952 vehicle * secondes.

2 - Première expérience de commande décentralisée : Cette expérience consiste à optimiser simultanément tous les noeuds du réseau global quand chacun des sous-réseaux comprend tous les noeuds du réseau global. La table suivante donne les résultats d'optimisation obtenus pour des valeurs croissantes de l'horizon d'optimisation.

Horizon T	Délai(100)
6	87,792
7	83,904
8	81,184
9	77,760
11	75,104
15	58,640
21	52,960
23	49,024
24	50,208
25	49,216

Table 1. effets de l'horizon d'optimisation

Il est clair que la performance est d'autant meilleure que la prédiction est plus avancée dans le futur. Toutefois la meilleure performance obtenue est encore inférieure à la performance obtenue par la méthode traditionnelle.

3 - Alternance des structures fixes et des structures variables : Nous réduisons encore l'erreur de coordination (due à une prédiction erronée de la commande aux noeuds voisins des noeuds choisis) en choisissant de ne pas optimiser simultanement tous les noeuds du réseau global.

Maintenant entre chaque paire de noeuds choisis nous intercalons un noeud dont la commande est fixe, c.à.d. non optimisée à cette étape. D'autre part au passage d'une étape d'optimisation à la suivante nous échangeons les noeuds choisis avec les noeuds non- choisis. Cette approche, pour T = 20 , a donné la performance Délai(100) = 42,400 , ce qui constitue une amélioration de 7.7% sur la meilleure commande de type traditionnel que nous ayons pu obtenir. Plus généralement on pourrait requérir un espacement de k noeuds "fixes" entre deux noeuds "optimisés"; toutefois pour un horizon T donné celà réduit considérablement le nombre de révisions auxquelles est soumise une commande proposée u_t avant d'être appliquée sur le terrain; d'autre part accroître T au delà d'une certaine limite n'est pas désirable car le modèle devient inexact par suite des phénomènes aléatoires qui affectent les flots de véhicules. Un compromis idéal est encore à rechercher entre les divers paramètres du système de commande (c.à.d. l'horizon T, la taille des sous-réseaux, la stratégie de sélection des noeuds à optimiser,...etc). Il est fort probable que ces paramètres eux mêmes devront être soumis à une commande adaptative sur une échelle de temps plus longue.

4 - Effet de la taille des sous-réseaux : Il est intéressant d'observer la performance qui résulte quand le sous-réseau associé à chaque noeud sélectioné pour optimisation ne comprend que les noeuds qui en sont éloignés d'au plus un arc. En effet ce choix de sous-réseaux qui correspond à la suggestion initiale de Miller a été retenu dans le système SCOOT. Après ce seul changement l'expérience ci-dessus, quand répétée, donne la performance Délai(100) = 60,112 veh.*sec.,soit une perte de 41% par rapport à la performance obtenue avec de plus grands sous-réseaux. Ceci montre que de considérer seulement les noeuds adjacents à un noeud, lors de l'optimisation de la commande à ce noeud, ne tire pas le meilleur parti du potentiel offert par la commande décentralisée en temps réel. Finalement on remarquera que la taille effective des sous-réseaux dépend du choix de l'horizon T, autrement dit la décomposition dans le temps et la décomposition dans l'espace ne sont pas indépendantes.

les expériences rapportées ci-dessus ont donné des résultats similaires quand appliquées à des réseaux plus complexes, comprenant des voies à double sens, la possibilité de tourner aux noeuds, etc.

Plusieurs années de recherche sur la résolution des problèmes $P_N(t)$ ont permi d'identifier et de développer des techniques d'optimisation suffisament efficaces pour que nous puissions envisager leur application sur le terrain par l'intermédiaire de micro-processeurs (7). Nos travaux actuels concernent les problèmes d'estimation de flots de véhicules à partir de détections locales. Des solutions originales et efficaces semblent possibles.

CONCLUSION

Nous avons montré que l'on peut espérer obtenir une commande décentralisée en temps réel de performance comparable aux meilleures techniques de commande centralisées actuellement disponibles. Il est vraisemblable que sur le terrain cette commande se révèlera nettement supérieure car elle prend en compte des détections récentes de véhicules réels, alors que la commande traditionnelle se base sur des données historiques statistiques. Cependant beaucoup de travaux de dévelopement restent encore à faire pour avoir complète assurance de cette supériorité. On remarquera aussi que la commande décentralisée a d'autes avantages potentiels que la simple performance, à savoir sa modularité, fiabilité, et surtout son coût; en effet, bien qu'elle soit beaucoup plus complexe que la commande traditionnelle, les modules qui la composent peuvent être soumis à une production de masse. D'autre part elle peut être intallée par étapes, sans requérir un investissement initial considérable.

BIBLIOGRAPHIE

1 - TRANSYT : A traffic network study tool, RRI Report LR 253, 1969
2 - Miller A.J. : A computer control system of traffic networks, Second Symposium on the Theory of Traffic Flow, London 1963.
3 - Hunt P.B.,Robertson D.I.,Bretherton R.D., Winston R.I. : SCOOT - A traffic responsive method of coordinating signals. TRRL Laboratory Report 1014, 1981.
4 - Engineering Foundation Conference, Henniker, New Hampshire, June 1981.
5 - Kaltenbach M. : Optimal control of time-varying flows in networks, R.A.I.R.O.,Operations Research, Vol.15, n.4, Nov. 1981.
6 - Sorenson H.W. : An overview of filtering and stochastic control in dynamic systems, Control and Dynamic Systems, N.12, C.T. Leondes ed., Academic Press 1976.
7 - Kaltenbach M. : Optimal control with constrained binary sequences, Proceedings 10th IFIP Conference, Springer-Verlag 1982.